

2. Единая система для планирования ремонтов на всех уровнях оперативно-диспетчерского и оперативно-технологического управления // URL: <http://www.asureo.ru/p/repair-planning.html> (дата обращения 10.08.2017).
3. Программный Комплекс «RealMaint» // URL: <http://www.rcm-systems.ru/solutions/1216/> (дата обращения 10.08.2017).
4. GLOBAL-EAM. Система управления техническим обслуживанием и ремонтами // URL: <http://global-eam.ru/> (дата обращения 10.08.2017).

Научный руководитель: А.В. Варганова, к.т.н., доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.

## **ВЫБОР СПОСОБА ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ РАЗОМКНУТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ УСЛОВИИ НЕИЗМЕННОСТИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ**

Ю.С. Иманова, А.В. Малафеев

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Для выбора мероприятий по управлению режимами в разомкнутых сетях 3–10 кВ промышленных предприятий, имеющих значительную протяженность, несколько ступеней распределения и трансформации, зачастую удобно пользоваться расчетными эквивалентами. Это целесообразно при большом количестве возможных оперативных состояний схемы и позволяет обойтись без применения специализированных программ расчета режимов, имеющих высокую стоимость, вследствие чего даже на крупных предприятиях количество рабочих мест с такими программами – одно-два. Критерии неизменности напряжений и токов в узлах примыкания обеспечиваются за счет применения распространенных способов эквивалентирования (см., например, [1]). Эквивалентирование же при инвариантности потерь мощности вызывает определенные сложности, что для разомкнутых сетей обусловлено зависимостью эквивалентной проводимости от распределения нагрузок в непреобразованной схеме.

Наметим два способа получения эквивалентов сети низшего напряжения:

1. схема группами «эквивалентная кабельная линия»–«эквивалентный трансформатор»;
  2. полное эквивалентирование на основе Г-образной схемы замещения.
- Для реализации первого способа выделим три типа присоединений:
3. кабельная линия (КЛ) до распределительной подстанции;
  4. КЛ, питающая трансформатор 10/6 кВ;
  5. КЛ, питающая трансформатор 10/3 кВ.

Рассмотрим результаты эквивалентирования на примере одной из подстанций крупного металлургического предприятия (рис. 1).

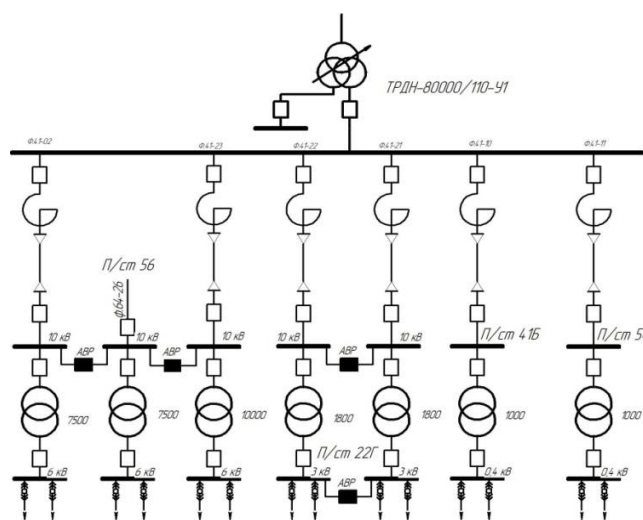


Рис. 3. Исходная схема распределительной сети

**1 способ.** Параметры эквивалентной схемы замещения, согласно п. 2, в виде кабельных линий перед трансформаторами, определяются путем сложения эквивалентов одного класса напряжения, связанных с трансформаторами с одинаковыми вторичными напряжениями (рис. 2).

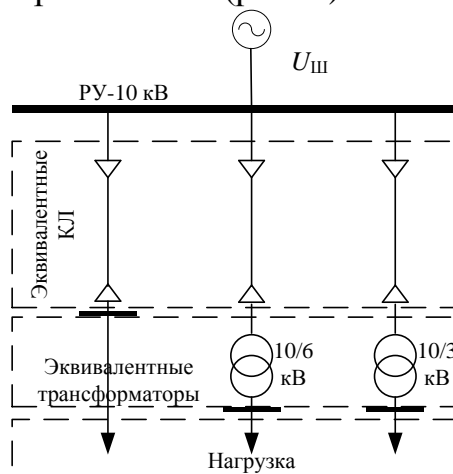


Рис. 4. Схема замещения группами «эквивалентная КЛ»-«эквивалентный трансформатор»

Параметры эквивалентных трансформаторов определяются по табл. 1.

Табл. 1. Параметры эквивалентных трансформаторов

Формулы	Принятые обозначения
$S_{\text{ЭКВ}} = \sum_{i=1}^N S_i ;$	$S_{\text{ЭКВ}}, S_i$ – номинальные мощности эквивалентного и $i$ -го трансформаторов, кВА;
$\Delta P_{\text{Х,ЭКВ}} = \sum_{i=1}^N \Delta P_{\text{Х},i} ;$	$\Delta P_{\text{Х,ЭКВ}}, \Delta P_{\text{Х},i}$ – потери холостого хода, кВт;
$I_{\text{Х,ЭКВ}} \% = \left( \frac{\sum_{i=1}^N I_{\text{Х},i} I_{\text{НОМ},i}}{\sum_{i=1}^N I_{\text{НОМ},i}} \right) \cdot 100\% ;$	$I_{\text{Х,ЭКВ}} (\%), I_{\text{Х},i} (\text{о.е.})$ – токи холостого хода; $I_{\text{НОМ},i}$ – номинальный ток $i$ -го трансформатора, А;
$\Delta P_{\text{К,ЭКВ}} = \sum_{i=1}^N \Delta P_{\text{К},i} ;$	$\Delta P_{\text{К,ЭКВ}}, \Delta P_{\text{К},i}$ – потери холостого хода, кВт;
$u_{\text{К,ЭКВ}} \% = \left( \frac{\sum_{i=1}^N u_{\text{К},i} U_{\text{НОМ},i}}{\sum_{i=1}^N U_{\text{НОМ},i}} \right) \cdot 100\%$	$u_{\text{К,ЭКВ}} (\%), u_{\text{К},i} (\text{о.е.})$ – напряжения короткого замыкания; $U_{\text{НОМ},i}$ – номинальное напряжение $i$ -го трансформатора, кВ

Эквивалентирование сопротивлений ( $R_{\text{ЭКВ}}$ ) кабелей производится с учетом параметров режима, полученных на основе реальных замеров в рассматриваемом оперативном состоянии схемы:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 \left( \frac{I_1}{I_{\text{ЭКВ}}} \right)^2 + R_2 \left( \frac{I_2}{I_{\text{ЭКВ}}} \right)^2 + \dots + R_n \left( \frac{I_n}{I_{\text{ЭКВ}}} \right)^n, \quad (1)$$

где 1, 2, ...,  $n$  – номера присоединений эквивалентруемой группы;

$I_{\text{ЭКВ}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$  – эквивалентный ток.

**2 способ.** На основе известных технических данных линий и трансформаторов сети НН может быть получена эквивалентная схема замещения сети в виде эквивалентных продольной и поперечной ветви (рис. 3), где сопротивление поперечной ветви  $\dot{Z}_{\text{х,ЭКВ}}$  определяется потерями холостого хода; к сопротивлению продольной ветви  $\dot{Z}_{\text{пр,ЭКВ}}$  присоединена эквивалентная нагрузка  $\dot{S}_{\text{нагр,ЭКВ}}$ .

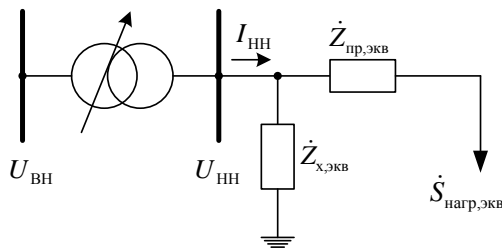


Рис. 5. Эквивалентная схема замещения в виде эквивалентных продольной и поперечной ветвей

В практических расчетах можно сделать допущение, что  $\dot{Z}_{\text{х,ЭКВ}}$  включает в себя только ветви холостого хода трансформаторов,  $\dot{Z}_{\text{пр,ЭКВ}}$  – сопротивления линий, трансформаторов и реакторов. Параметры эквивалентных продольной и поперечной ветвей определяются по формулам, приведенным, например, в [2]. Эквивалентирование продольных ветвей ( $\dot{Z}_{\text{пр,ЭКВ}}$ ) выполняется по (1).

Оценим погрешность эквивалентирования по рассмотренным способам при помощи метода Монте-Карло. Для каждого случая выполним 60 вычислительных экспериментов при одинаковом питающем напряжении 11 кВ и неизменной суммарной мощности нагрузки. Мощность нагрузки определяется генератором случайных чисел с одинаковым коэффициентом вариации по активной и реактивной мощности, равным 0,2. Для генерации случайных чисел принят нормальный закон распределения. Расчеты выполнялись в Excel 2013. Полученные средние значения суммарных потерь приведены в табл. 2.

Табл. 2. Математическое ожидание потерь мощности

Схема	Исходная (рис. 1)	«Экв. КЛ»- «Экв. трансформатор» (рис. 2)	Полное эквивален- тирование (рис. 3)
Потери мощности, кВт	130,41	129,94	141

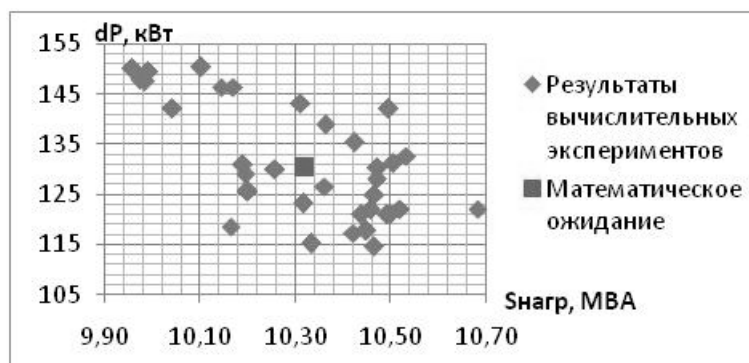


Рис. 6. Область рассеяния потерь в исходной схеме

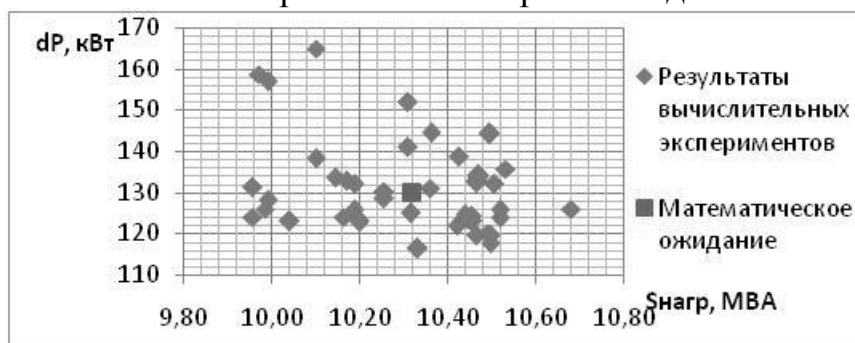


Рис. 7. Область рассеяния потерь в схеме группами «эквивалентная КЛ» - «эквивалентный трансформатор»

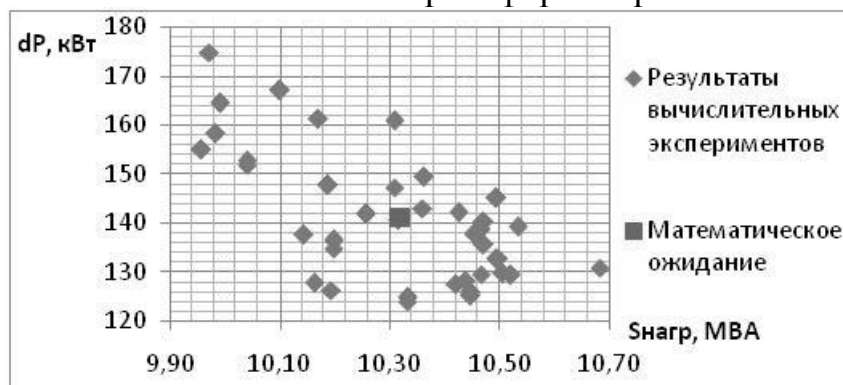


Рис. 8. Область рассеяния потерь в эквивалентной схеме с Г-образным замещением

Математическое ожидание потерь активной мощности при номинальном напряжении и нормальной схеме подстанции составляет 130,4 кВт. Отклонения математических ожиданий: для схемы по рис. 2 – 0,08%; для схемы по рис. 3 – 8% по отношению к непреобразованной схеме.

Таким образом, значения потерь мощности, полученные на основе двух рассмотренных способов эквивалентирования, близки к значениям, полученным по исходной расчетной схеме подстанции. Следовательно, оба способа можно применять для практических расчетов, предпочтение по возможности следует отдавать первому. Общим недостатком является зависимость параметров эквивалентной схемы от параметров режима.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Жуков Л.А., Стратан И.П. Установившиеся режимы сложных расчетов электрических сетей и систем: Методы расчета. – М.: Энергия, 1979. – 416 с.
2. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.

Научный руководитель: А.В. Малафеев, к.т.н., доцент кафедры ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

К.М. Чубаров, Н.В. Сенько

Самарский государственный технический университет

В настоящее время актуальность вопросов, связанных с аппроксимацией областей статической апериодической устойчивости в пространстве регулируемых параметров, существенно возросла. Это вызвано широким внедрением в электроэнергетических системах (ЭЭС) новых информационно-вычислительных комплексов для решения задач оперативного диспетчерского и противоаварийного управления. Использование математического аппарата, построенного на уравнениях предельных режимов (УПР), дает ряд преимуществ перед другими методами аппроксимации границ области устойчивости.

Для аппроксимации областей устойчивости используют несколько различных методов:

- метод кусочно-линейной аппроксимации;
- метод кусочно-линейной аппроксимации путём ограничения области существования режимов отрезками прямых;
- метод аппроксимации области устойчивости (ОУ) на основе решения УПР.

Метод аппроксимации на основе решения УПР имеет более общий подход к решению поставленной задачи. В работе [1] предложен оригинальный метод, основанный на применении УПР. Исходя из решения этих уравнений, можно определить значение вектора независимых параметров  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_i]^T$ . Регулируемые параметры  $y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_i]^T$  находятся из УПР и соответствуют найденным значениям  $x$ . Известно, что границы ОУ  $L_w$  – это гиперповерхности в многомерном пространстве  $y$  и лишены наглядности. Для того, чтобы обеспечить наглядность границ ОУ, используем методику аппроксимации, которая базируется на замене  $L_w$  выпуклым многоугольником [2]. Решением УПР являются координаты вектора  $R$ , который совпадает с направлением нормали к  $L_w$  (рис. 1). В случае составления подобных уравнений для ряда точек  $L_w$  можно получить кусочно-линейную аппроксимацию границы ОУ для вершины М: